生物炭施加对微咸水滴灌棉田土壤水热盐及棉花生长的影响

赖虹雨，　吕德生，　朱　艳，　王振华，　温　越，　宋利兵，　齐　浩

（石河子大学水利建筑工程学院，现代节水灌溉兵团重点实验室，农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室，新疆 石河子　832000）

摘　要：为解决北疆淡水缺乏和土壤质量下降的问题，通过大田试验探明不同灌水矿化度及生物炭施加量对棉田土壤水热盐环境及棉花生长的影响。设置4个生物炭施加水平（B0：0 t·hm⁻²、B1：20 t·hm⁻²、B2：40 t·hm⁻²、B3：60 t·hm⁻²）和3个灌水矿化度水平（S1：1 g·L⁻¹、S2：3 g·L⁻¹、S3：5 g·L⁻¹），采用双因素完全随机组合试验，研究不同处理对土壤水盐温分布、棉花生长指标、干物质积累量、产量及水分利用率的影响。结果表明：施加生物炭与灌水矿化度的增加均使得土壤含水率和含盐量升高。生物炭施加量的增加使得平均土壤温度升高，升高幅度介于5.9%~15.1%，灌水矿化度对平均土壤温度存在显著影响，但各处理间差异不显著。生物炭施加提高棉花株高、叶面积指数和地上部干物质量。棉花籽棉产量和水分利用率最大值均出现在B2S2处理，为6526.4 kg·hm⁻²和2.01 kg·hm⁻²；最小值均出现在B0S3处理，较B2S2处理分别减少18.50%和26.87%。构建多元回归方程，基于棉花高产、高水分利用率；结合归一化处理和空间分析得出最佳生物炭施加量、灌水矿化度区间分别为26~46 t·hm⁻²和2.45~3.04 g·L⁻¹。

关键词：生物炭施加量；微咸水矿化度；棉花生长；产量；多元回归分析

新疆用水总量为565.38×10⁸ m³，其中灌溉用水527.68×10⁸ m³，灌溉用水消耗了大量的淡水资源，占比93%以上[1]。新疆地区微咸水天然补给量占西北内陆区的57.6%，每年可开发的咸水资源量为17.24×10⁸ m³[2-3]。为维持作物产量，确保农业生产，减轻淡水资源压力，应用微咸水灌溉已成为必然趋势。庞桂斌等[4]研究表明，采用微咸水灌溉可节约50%~67%淡水资源；马凯等[5]研究表明，当灌水矿化度在1.35~2.52 g·L⁻¹时，棉花产量、马克隆值和纤维长度达到最优。然而，长期使用微咸水会造成次生盐碱化，引发土壤结构不稳定、表面结皮和渗透性能下降等诸多问题，进而对土地资源的可持续利用产生不利影响[6-7]。与此同时，当土壤中盐分过高会导致土壤溶液渗透势下降，抑制根系对水分的吸收及作物生长，引起作物离子毒性和养分的不平衡，进而影响作物的正常新陈代谢过程。Munns等[8]研究发现，盐胁迫会抑制作物生长，加速作物衰老，减少碳同化物的积累，降低作物产量。因此，在应用微咸水灌溉的同时，改善土壤质量、促进作物稳产高产对新疆农业发展具有重要意义。

施加生物炭可以有效降低土壤容重，改良酸性土壤，增强土壤的通气性和透水性[9-10]；促进植物在盐碱胁迫下的养分吸收，提高叶片的气体交换系数，增强作物光合能力[11]，进而促进作物生长。Huang等[12]研究表明，施加生物炭使土壤容重降低5.5%~11.6%；勾芒芒等[13]研究发现，施加生物炭通过提高作物含水率、减少盐分离子吸收、促进养分摄入、调节植物激素等，在减轻盐胁迫危害的基础上，增强了作物耐盐能力；唐光木等[14]在新疆灰漠土中添加生物炭种植玉米，结果表明施加生物炭能显著提高土壤有机质含量，促进玉米根系生长，提高玉米产量；Usman等[15]研究表明，在咸水灌溉的条

收稿日期：2023-05-07；　**修订日期：**2023-11-21
基金项目：国家重点研发计划课题(2021YFD1900802); 国家自然科学基金项目(52169011, 52169012); 八师石河子市重点领域科技攻关项目(2022NY04); 石河子大学创新发展专项项目(CXFZ202106)
作者简介：赖虹雨(2000-)，女，硕士研究生，主要研究方向为节水灌溉理论与技术. E-mail: lhy127207@163.com
通讯作者：吕德生. E-mail: 13899536225@163.com

件下，使用生物炭可以减轻盐胁迫对土壤生产力的不利影响，提高番茄产量。适量生物炭可促进作物生长，提高产量，但过量施加反而不利于产量提升。陈芳等[16]研究发现，施用20 t·hm^{-2}果木木炭使得水稻的产量增加20.00%，但施用40 t·hm^{-2}产量减少15.16%；蒋惠等[17]研究发现，随生物炭施加量的增加，砂糖橘的产量呈现先增加后降低的趋势。

近年来，关于微咸水和生物炭的研究多集中于微咸水灌溉或单施加生物炭量对作物生长以及土壤理化性质的影响，缺乏大田条件下微咸水灌溉和生物炭施加协同作用对土壤水热盐调控及作物生长影响的研究。考虑到北疆地区微咸水资源丰富和农田土壤地力下降等突出问题，本研究以“滴灌棉田土壤水热盐环境及棉花生长对微咸水灌溉和生物炭施加的耦合作用的响应”为关键科学问题，试验中将灌水矿化度和生物炭施加量相结合，分析二者协同对土壤水盐分布、土壤温度、棉花生长指标、产量及水分利用率的影响，探究适合北疆地区棉田的灌水矿化度和生物炭施加量组合模式，以期为北疆地区微咸水灌溉提供技术指导，为改善土壤质量和促进农业可持续发展提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

2022年4—10月于新疆石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室暨石河子大学节水灌溉试验站（86°03′47″E，44°18′28″N，海拔450 m）开展试验。该地区为典型温带大陆性气候，2022年棉花生育期日气温及降水量如图1所示，2022年日照时间、平均降水量和蒸发量分别为2865 h、207 mm、1660 mm。供试土壤为壤土，0~100 cm土层的土壤理化性质如表1所示。

1.2　试验设计

试验中所选用的棉花品种为“新陆早42号”。

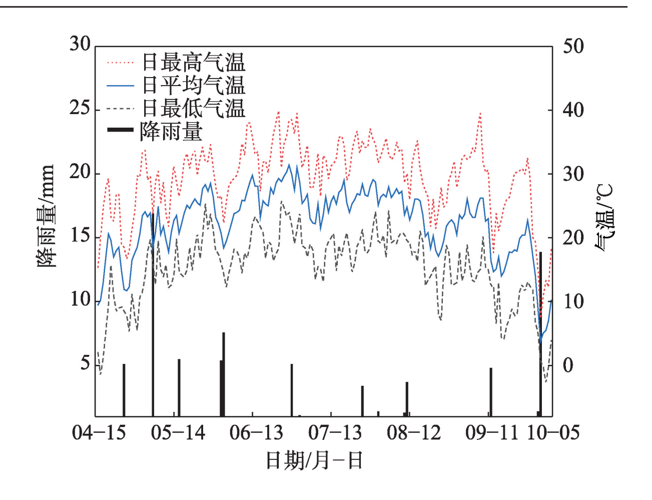


图1　2022年棉花生育期内日气温及降水量

Fig. 1　Daily temperature and precipitation during cotton growth period in 2022

依据生产实践及前人研究[18-19]，试验设置3个灌水矿化度水平：1 g·L^{-1}（S1）、3 g·L^{-1}（S2）、5 g·L^{-1}（S3），通过当地灌溉用水与工业用盐（主要成分：NaCl≥99.1%）人工调配实现；4个生物炭施加量水平：0 t·hm^{-2}（B0）、20 t·hm^{-2}（B1）、40 t·hm^{-2}（B2）、60 t·hm^{-2}（B3），其中，B0S1为对照处理，12个处理，设置3个重复，共36个小区，小区面积为15 m^2（5 m×3 m），相邻小区间设置保护行且设置0.5 m宽的隔离带防止各小区间生物炭产生交叉影响。试验于2022年4月7日进行生物炭施加布置，生物炭由人工铺洒后机械均匀翻耕至0~40 cm土壤中，生物炭采用棉花秸秆炭，容重0.4 g·cm^{-3}，总碳含量71.6%，灰分16.50%，比表面积82.7 m^2·g^{-1}，pH 9.37，导热系数0.172 W·m^{-1}·K^{-1}。

依据当地农户种植模式，采用“1膜3管6行”的机采棉覆膜种植模式（图2），地膜宽2.05 m，膜间距30 cm，滴灌带间距为76 cm，滴头间距30 cm，株距10 cm。试验采用独立的蓄水桶来分别控制各处理的灌水矿化度。棉花于2022年4月17日播种，10月5日收获，全生育期共计172 d（表2）。参考前人对北疆膜下滴灌棉花的研究成果[20]确定棉花生育期

表1　试验区土壤理化性质

Tab. 1　Soil properties of the experimental plot

土壤深度/cm	土壤容重/(g·cm^{-3})	土壤含盐量/(dS·m^{-1})	pH	土壤有机质/(g·kg^{-1})
0~20	1.55	2.48	7.74	1.52
20~40	1.49	2.15	7.83	1.79
40~60	1.58	2.02	7.90	1.90
60~80	1.64	1.89	8.07	1.45
80~100	1.63	1.81	7.89	1.67

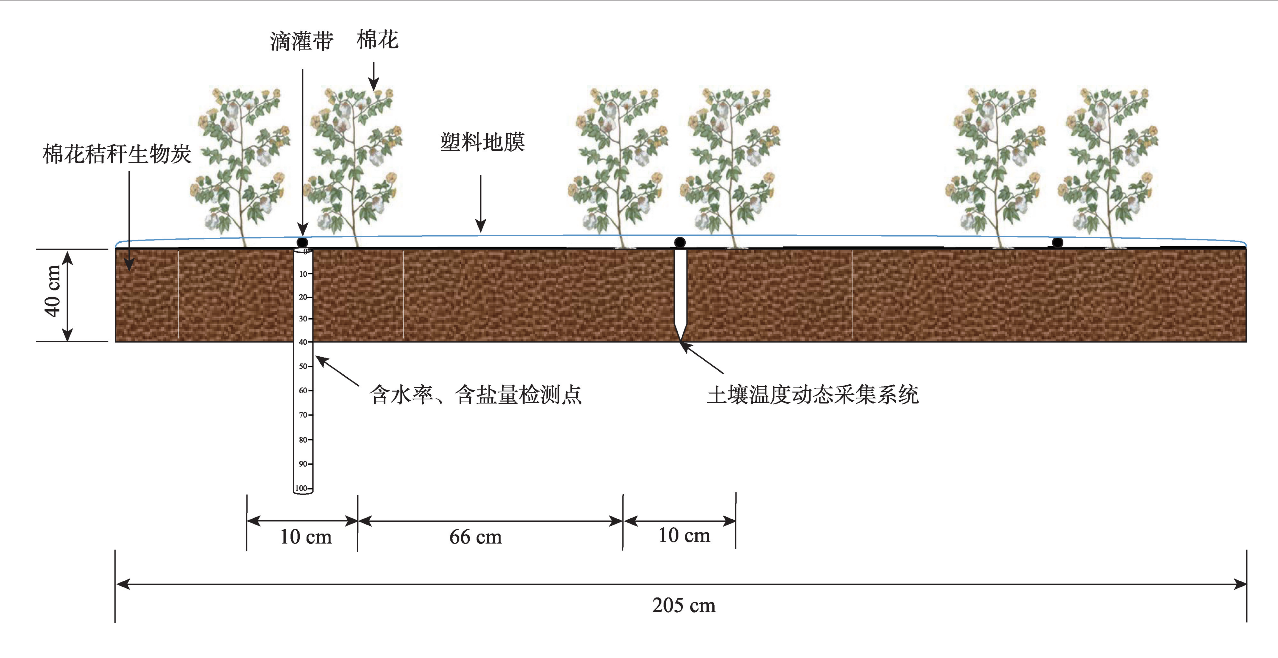


图2 棉花种植模式

Fig. 2 Cotton planting pattern

表2 棉花生育期灌溉制度

Tab. 2 Irrigation schedule of cotton growth period

生育期	灌水日期/月-日	灌水量/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	施肥量/($kg \cdot hm^{-2}$)	
			尿素	磷酸二氢钾
苗期	04-17	42	59	29.5
蕾期	06-05	42	59	29.5
	06-15	42	59	29.5
	06-25	42	59	29.5
	07-05	42	59	29.5
花铃期	07-15	42	59	29.5
	07-24	42	59	29.5
	08-03	42	59	29.5
	08-12	42	59	29.5
吐絮期	08-21	42	59	29.5
全生育期	04-17—10-05	420	590	295

灌水制度，其他农艺措施同当地农户种植保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率 在棉花播种前、苗期、蕾期、花铃期、吐絮期和收获后利用土钻进行取样，采用烘干法测定土壤含水率，取土位置在中行棉花与滴灌带之间（图2），取土土层为0~100 cm，每10 cm为一层，共10层。

1.3.2 土壤含盐量 取样时间、方法和位置与土壤含水率相同。待土样烘干后，采用电导率仪（DDS-11A数显式，上海雷磁）测定浸提液电导率，含盐量计算公式如下[21]：

$$y = 0.0712x^{0.5768} \quad (1)$$

式中：y为含盐量($g \cdot kg^{-1}$)；x为电导率($\mu S \cdot cm^{-1}$)。

1.3.3 土壤温度 棉花定苗后，于每个生育时期末每个处理在膜上距中间行棉花5 cm处将土壤温度动态采集系统（YM-GS，邯郸创盟电子科技）埋设在0~40 cm的土层中（图2），测定10 cm、20 cm、30 cm、40 cm土壤温度。

1.3.4 株高及叶面积指数 各小区选择3株长势均匀的植株进行标记，于每个生育期末测其株高和叶面积[22]。叶面积指数（LAI）使用下式[22]计算：

$$\mathrm{LAI} = 0.84\frac{\rho\sum_{i=1}^{j} L_i \times B_i}{10000} \quad (2)$$

式中：LAI为叶面积指数，折算系数取0.84；ρ为棉花播种密度（株·m^{-2}）；i为单株第i片叶片；j为单株棉花叶片数；L和B分别为叶片长和宽（cm）。

1.3.5 地上部干物质积累 在每个小区选取代表性的3株棉花，于花铃期末将棉花植株的茎、叶、蕾（铃）等器官分离后放入烘箱105 °C杀青30 min，于75 °C下烘干至恒重，称量棉花各器官的干物质量。

1.3.6 棉花产量、产量相关构成因素及水分利用率 棉花完全吐絮后，在每小区选取5 m^2长势均匀的地块用于实收测产且换算为标准产量，并随机选取3株具有代表性的植株测量单株成铃数以及摘取

100个棉铃的籽棉进行百铃质量的测量。作物耗水量(ET)计算公式如下[23]

$$ET = \Delta W + P_r + I + V - D - R \quad (3)$$

式中:ET为作物耗水量(mm);ΔW为土壤贮水量的变化量(mm);P_r为有效降水量(mm);I为灌溉量(mm);V、D、R分别为地下水补给量、深层渗漏量、径流量(mm)。试验区地势平坦,降雨较少,且蒸发强烈,深层渗漏量D和径流量R可忽略不计;根据观测田间地下水埋深在8 m以下,地下水深层补给V忽略不计。

水分利用率(WUE)计算公式为[22]:

$$WUE = 0.1 \times \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中:WUE为水分利用率(kg·m^{-3});Y为籽棉产量(kg·hm^{-2});ET为作物耗水量(mm)。

1.4 数据处理与分析方法

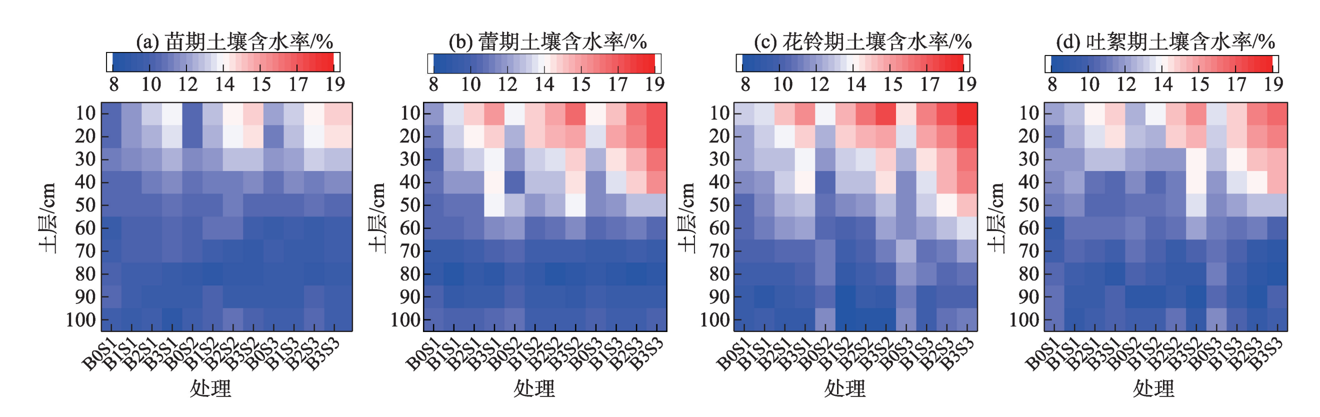
采用Excel 2016对数据进行整理和计算,用SPSS 26.0统计软件对数据进行方差分析、显著性检验分析和回归分析,用Origin 2021统计分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 生物炭施加和微咸水滴灌对土壤水盐分布的影响

不同处理各生育期土层含水率分布如图3所示,在棉花各生育期内,随着土层深度的增加,土壤含水率呈现降低的趋势。苗期至蕾期,在同一生物炭施加量下,0~40 cm土壤土层含水率均值均表现为:S3>S2>S1,施加生物炭处理均高于未施加生物炭处理,分别增幅为7.5%~22.5%、12.9~33.3%,40~100 cm土壤各处理土壤含水率均无明显差异。花铃期,在相同生物炭施加量下,0~40 cm土层中S2、S3处理较S1处理土壤含水率分别增加2.1%~13.1%、2.1%~15.7%;60~80 cm土壤含水率无显著差异,说明灌水矿化度增加了土壤含水率,其原因可能是Na^+的增加会引起土壤颗粒的膨胀,并使其透水性降低,使得水分易于入渗到中间层[24]。在同一灌水矿化度下,0~50 cm土层中B1、B2和B3处理的土壤含水率均高于B0处理,而在B3处理土壤含水率均达到最大,说明施加生物炭均提升了土壤含水率,其中,B3处理保水效果最好,土壤含水率较B0处理增加17.2%~41.8%。吐絮期,S2和S3处理0~30 cm土层含水率较CK增加了2.7%~9.3%、12.0%~17.3%,较未施加生物炭,施加生物炭处理提高1.9%~20.5%,其余土层含水率差异不显著。

不同处理各生育期土层的土壤含盐量分布如图4所示。苗期时,各处理之间土壤盐分差异不显著。蕾期至吐絮期,在相同生物炭施加量下,随灌水矿化度增加,土壤盐分也呈增加趋势。蕾期,0~50 cm土层中S2、S3处理较S1处理土壤含盐量分别增加了11.6%~12.9%、14.1%~22.2%,施加生物炭处理均高于未施加生物炭处理,分别增幅为2.4%~14.2%。花铃期至吐絮期,施加生物炭及不同灌水矿化度对土壤含盐量均达显著水平($P<0.05$)。以花铃期为例,0~100 cm土层中S2、S3处理较S1处理棉花土壤含盐量分别增加24.1%~61.3%、14.7%~32.7%。在同一灌水矿化度下,在0~40 cm土层中B1、B2和B3处理的土壤含盐量均高于B0处理,相



注:B0、B1、B2和B3分别代表生物炭不同施加量,依次为0、20、40 t·hm^{-2}和60 t·hm^{-2};S1、S2和S3分别代表不同灌溉矿化度,依次是1、3 g·L^{-1}和5 g·L^{-1}。下同。

图3　0~100 cm各处理不同生育期土壤含水率分布

Fig. 3　Distribution of soil water content in different growth stages under different treatments from 0 to 100 cm

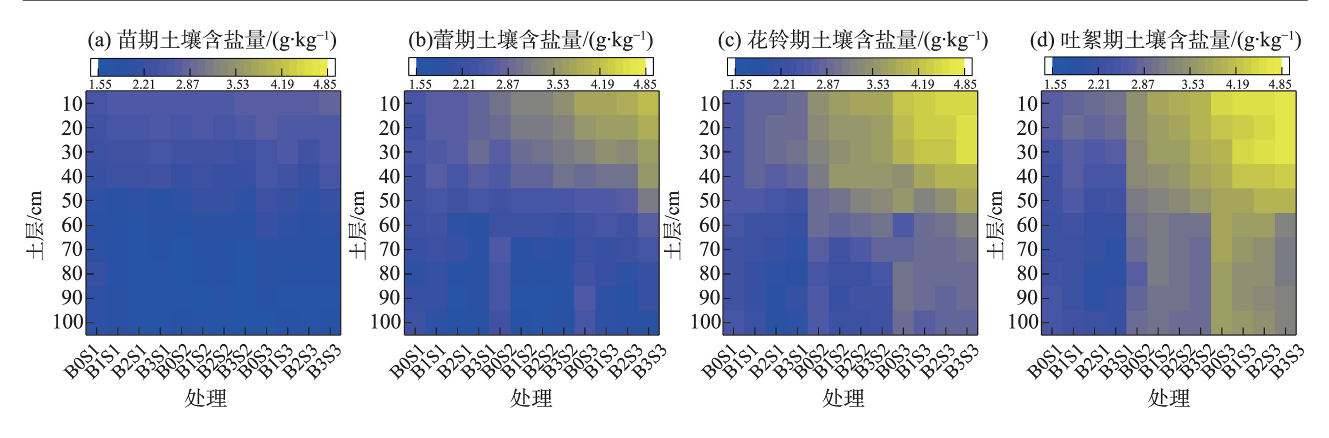


图4 0~100 cm各处理不同生育期土壤含盐量分布

Fig. 4 Distribution of soil salt content in different growth stages under different treatments from 0 to 100 cm

较于B0处理，B1、B2和B3处理分别增加了2.1%~11.8%、3.3%~14.1%和5.6%~16.9%，说明生物炭的施加均提升了土壤含盐量，其原因可能是生物炭自身所含的盐分以及具有较强的吸附能力吸附盐分离子。

2.2 生物炭施加和微咸水滴灌对0~40 cm土层平均土壤温度的影响

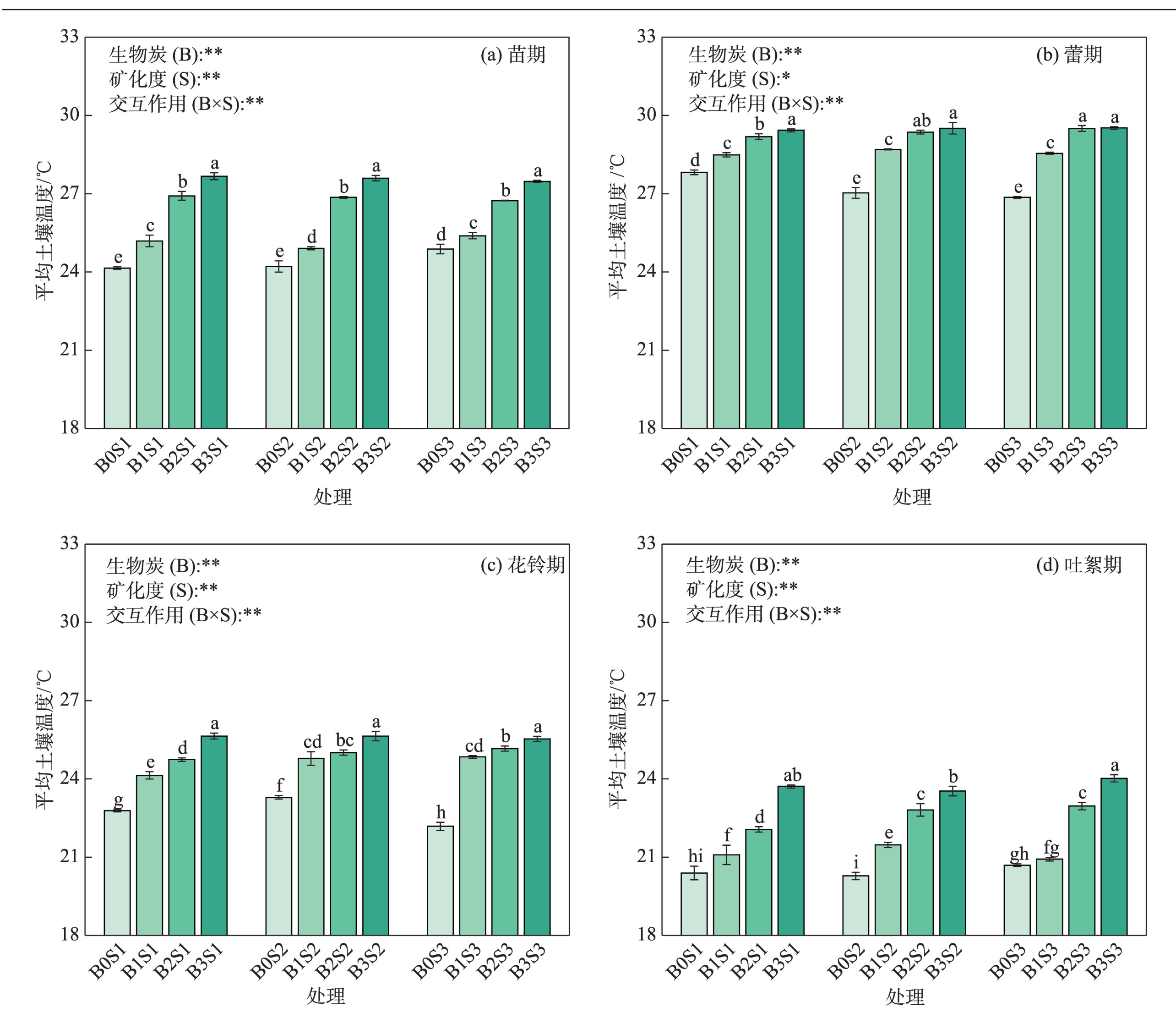
全生育期内，0~40 cm土层平均土壤温度随棉花的生长呈现先增加后减小的趋势(图5)，其变化趋势与棉花生育期气温(图1)一致。在苗期，生物炭施加显著升高土壤温度，相较于B0处理，B1、B2和B3处理土壤温度分别增加了2.1%~4.3%、7.8%~11.5%、10.4%~14.6%(P<0.05)；但灌水矿化度对土壤温度影响差异不显著。在蕾期，土壤温度达到峰值，同一矿化度下，B1、B2和B3处理平均土壤温度较B0处理分别显著增加了0.23~2.66 °C、1.37~2.98 °C、1.61~3.52 °C(P<0.05)。对B0处理而言，S2和S3处理较S1处理分别降低了0.79 °C、0.96 °C；在B1、B2和B3处理下，S2和S3处理较S1处理下分别增加了0.08~0.21 °C、0.06~0.31 °C；花铃期至吐絮期，灌水矿化度及生物炭施加量对土壤温度的影响均达到显著水平(P<0.05)。以花铃期为例，在B0、B1和B2处理下，S2处理较S1处理下增加了1.1%~2.7%；在B0处理下，S3处理较S1处理降低2.6%，在B1和B2处理下增加1.7%~3.0%。与B0处理相比，B1、B2和B3处理分别增加5.9%~12.6%、6.4%~10.1%、12.0%~15.1%。生物炭施加量和灌水矿化度对土壤温度均存在极显著交互作用影响(P<0.01)。结果表明，生物炭在棉花的生育期内具有较好的增温效果，不同灌水矿化度影响着土壤温度，但差异不显著。

2.3 生物炭施加和微咸水滴灌对棉花株高、叶面积指数的影响

不同处理对棉花的株高、叶面积指数如图6所示。苗期各处理间棉花株高、叶面积指数无显著差异。蕾期，S2处理株高较S1处理显著增加1.2%~6.6%(P<0.05)，S3处理较S1处理株高无显著差异，S2、S3处理叶面积指数较S1处理无显著差异；较B0处理，施加生物炭下棉花株高显著增加0.9%~12.4%(P<0.05)，叶面积指数增加11.2%~43.2%，但差异不显著。花铃期至吐絮期，施加生物炭及灌水矿化度对棉花株高达到显著水平(P<0.05)，对叶面积指数差异不显著。以花铃期为例，适宜的灌水矿化度对棉花株高和叶面积指数有促进作用，但过高的灌水矿化度会抑制棉花株高和叶面积指数，S2处理较S1处理棉花株高、叶面积指数分别增加1.8%~9.2%、2.5%~5.7%，S3处理株高、叶面积指数较S1处理分别降低了1.2%~5.7%、2.0%~4.0%。施加生物炭有助于提高棉花株高和叶面积指数，与不施加生物炭处理相比(B0)，棉花株高显著增加2.8%~20.3%(P<0.05)，叶面积指数增加7.4%~23.4%。

2.4 生物炭施加和微咸水滴灌对棉花地上部干物质量的影响

花铃期是棉花地上部干物质量积累的关键时期。由图7可知，同一生物炭施加量下，相较S1处理，S2处理下棉花茎、蕾、叶及地上部干物质量分别增加7.5%~25.2%、2.9%~14.2%、0.4%~16.2%、7.8%~15.7%，S3处理降低了2.7%~13.5%、8.6%~15.0%、0.6%~17.3%、5.2%~15.7%。施加生物炭显著促进了棉花地上部干物质积累，与B0处理相比，施加生物



注：不同小写字母表示0.05水平差异显著；*和**分别代表 P<0.05和 P<0.01水平上差异显著，ns表示差异不显著。下同。

图5　棉花不同生育时期0~40 cm土层平均土壤温度

Fig. 5　The average soil temperature of 0−40 cm soil layer at different growth stages of cotton

炭使棉花茎、蕾、叶及地上部干物质总量分别增加0.8%~45.9%、5.7%~43.5%、6.7%~44.1%、6.0%~45.8%。棉花茎、蕾、叶及地上部干物质均在B2S2处理达到最大。由方差分析可知，生物炭施加量和灌水矿化度对茎、蕾、叶及干物质量均存在极显著影响（P<0.01），生物炭施加量和灌水矿化度二者交互作用对蕾干物质量存在极显著影响（P<0.01）。以上分析表明，过高的灌水矿化度抑制棉花生长；灌水矿化度为3 g·L^{-1}时，生物炭施加量为40 t·hm^{-2}对棉花茎、蕾、叶及地上部干物质量的促进作用最大。

2.5　生物炭施加和微咸水滴灌对棉花产量、产量构成和水分利用率的影响

不同处理对棉花产量、产量构成和水分利用率的影响如表3所示。适宜的灌水矿化度和生物炭施加量增加单株有效铃数与单铃质量，进而提高籽棉产量及水分利用率。生物炭施加量相同时，增加灌水矿化度，棉花产量、水分利用率均表现为先增加后降低的趋势。与S1处理相比较，S2处理棉花产量平均增加7.8%，单株有效铃数平均增加6.9%，单铃质量平均增加6.8%，水分利用率增加4.2%~12.8%；S3处理棉花较S1产量平均降低4.8%，单株有效铃数平均降低6.7%，单铃质量平均降低6.6%，水分利用率显著降低4.2%~12.8%（P<0.05），作物耗水量增加4.5%~8.6%。与B0处理相比，施加生物炭显著增加棉花产量2.9%~8.3%（P<0.05），单株有效铃数增加1.7%~11.5%，单铃质量增加2.6%~10.6%，棉花水

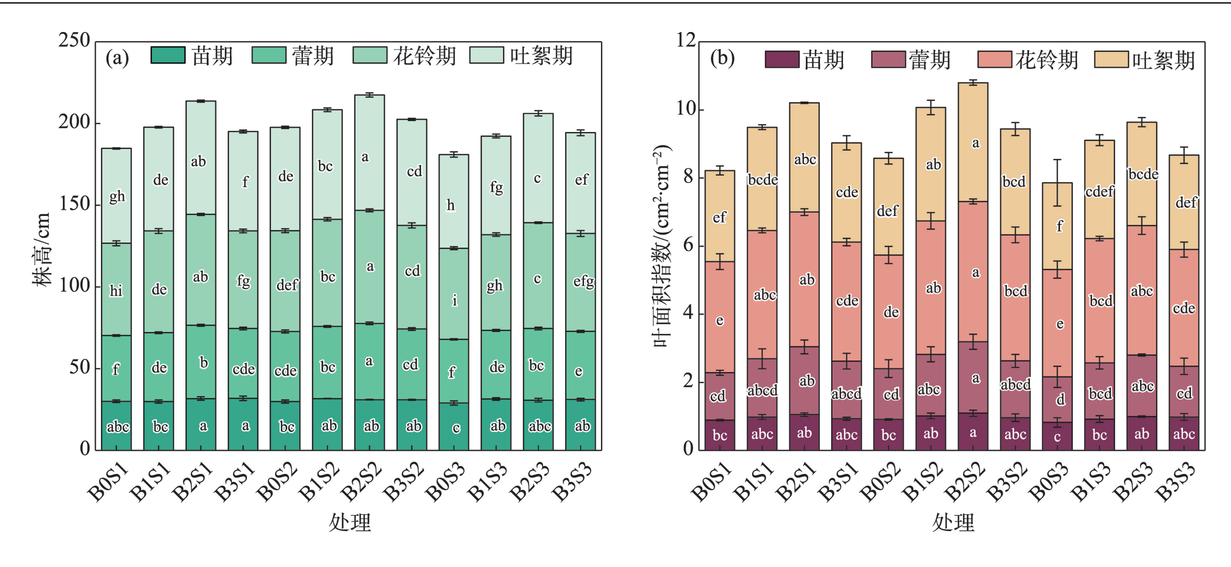


图6 灌水矿化度和生物炭对棉花株高、叶面积指数的影响

Fig. 6 Effects of irrigation water salinity and biochar on cotton plant height and leaf area index

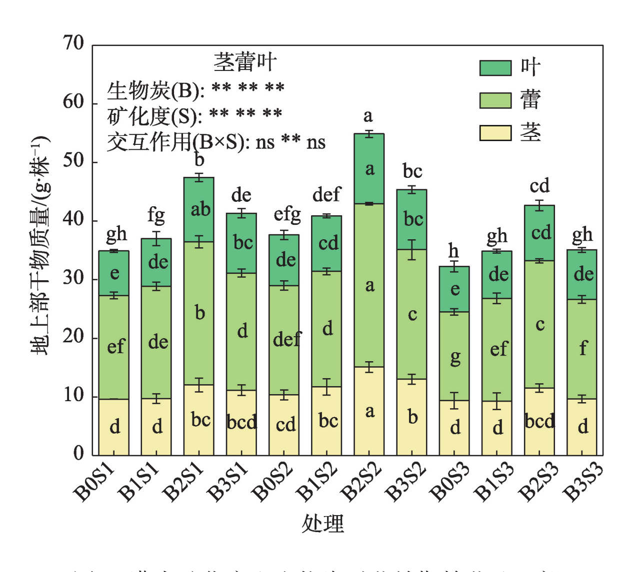


图7 灌水矿化度和生物炭对花铃期棉花地上部干物质量的影响

Fig. 7 Effects of irrigation water salinity and biochar on above-ground dry matter quality of cotton at flowering and boll-forming stage

分利用率增加2.8%~14.4%,作物耗水量降低0.1%~8.2%,其中,B2S2处理水分利用率最高,为2.01 kg·m^{-3};B0S3处理水分利用率最低,为1.47 kg·m^{-3}。施加生物炭均能有效提高棉花水分利用率(P<0.01),生物炭和灌水矿化度两者交互作用对水分利用率存在极显著影响(P<0.01)。

2.6 对棉花最佳生物炭施加量、灌水矿化度分析

以生物炭施加量、灌水矿化度为自变量,棉花产量和水分利用率2个指标为因变量,分别构建二元二次回归方程。如表4所示,非线性回归分析表明,生物炭施加量、灌水矿化度对各因变量的影响均极显著(P<0.01),其决定系数均在0.87以上。

由于棉花产量指标与水分利用率相关指标无法同时达到最大值,且二者具有不同的量纲,无法直接进行比较,故将其进行归一化处理后进行评价,由图8可以看出,各指标在相对值0.96可接受区域产量和水分利用率存在重合区域,因此,认定相对值≥0.96为合理可接受区域。将棉花产量与水分利用率的指标相对值0.96等高线投影,得出综合分析图9。从图9可知,棉花产量与水分利用率在相对值0.96时达到最佳,生物炭施加量、灌水矿化度区间分别为26~46 t·hm^{-2}和2.45~3.04 g·L^{-1}。

3 讨论

3.1 生物炭施加和微咸水滴灌对土壤水盐分布的影响

土壤水盐变化反映了作物生长的水盐环境及蒸发蒸腾耗水状况。土壤水分携带着盐分不断运动,土壤盐分"随水来,随水去"。本研究表明,随灌水矿化度增加,土壤含水率呈逐渐增加的趋势,与吴忠东等[25]研究结论一致,一方面微咸水灌溉改善土壤孔隙度,提升了土壤容水性能;另一方面随灌水矿化度增加,土壤中含盐量显著增加,间接抑制作物根系水分吸收,提高土壤含水率[26]。赵子璇等[27]通过土柱垂直入渗试验,发现生物炭对土壤有减渗作用,提高土壤含水率,这与本研究结果相同,生物

表3　不同处理对棉花产量及产量构成、作物耗水量和水分利用率的影响

Tab. 3　Effects of different treatments on cotton yield and yield components, crop water consumption and water use efficiency

处理	单株有效铃数/(个·株$^{-1}$)	单铃质量/g	籽棉产量/(kg·hm^{-2})	作物耗水量/mm	水分利用率/(kg·m^{-3})
B0S1	9.61±0.13cde	5.50±0.20bcd	5614.73±96.47ef	343.68±10.16bcd	1.63±0.03e
B1S1	10.59±0.88abcd	5.74±0.46abcd	5870.47±85.77d	341.72±3.49cd	1.72±0.04de
B2S1	10.71±0.49abc	6.03±0.36abc	6030.96±62.54c	332.68±12.60de	1.81±0.05c
B3S1	10.38±0.73abcde	5.64±0.11abcd	5776.84±44.33d	334.23±11.87de	1.73±0.05d
B0S2	10.67±0.41abcd	5.81±0.40abcd	6043.24±65.11c	353.90±4.69bc	1.71±0.01de
B1S2	11.21±1.01a	6.20±0.42a	6324.02±91.83b	325.21±2.23e	1.94±0.03ab
B2S2	11.37±0.67a	6.31±0.26a	6526.35±117.66a	324.98±7.60e	2.01±0.05a
B3S2	10.85±0.55ab	6.13±0.12ab	6219.14±68.33b	334.32±9.04de	1.86±0.07bc
B0S3	9.23±0.79e	5.12±0.45d	5318.65±71.4g	359.26±3.06ab	1.47±0.02f
B1S3	9.46±0.38de	5.34±0.23cd	5557.56±47.58f	371.17±11.24a	1.50±0.06f
B2S3	10.14±0.48abcde	5.66±0.54abcd	5767.33±30.32de	351.66±4.60bc	1.64±0.03e
B3S3	9.68±0.21bcde	5.29±0.23d	5538.21±78.09f	358.79±5.51ab	1.54±0.01f
B	3.340*	3.569*	54.761**	6.179**	41.831**
S	15.478**	14.699**	289.344**	36.178**	208.385**
B×S	0.313ns	0.092ns	0.305ns	3.452*	3.898**

注:不同小写字母表示0.05水平差异显著;B为不同生物炭施加量处理,S为不同灌水矿化度处理;*和**分别代表$P<0.05$和$P<0.01$水平上差异显著,ns表示差异不显著。下同。

表4　生物炭施加量和灌水矿化度与产量及水分利用率之间的回归关系

Tab. 4　Regression relationship between biochar application and irrigation water salinity, yield and water use efficiency

输出变量	回归方程	决定系数	显著性
产量	Y_1=4932.58+813×S+22.48×B−148.46×S^2−0.33×B^2+0.28×S×B	0.95182	＜0.01
水分利用率	Y_2=1.28+0.24×S+0.005×B−0.043×S^2−0.000063×B^2+0.00016×S×B	0.87970	＜0.01

注: S和B分别代表灌水矿化度、生物炭施加量。

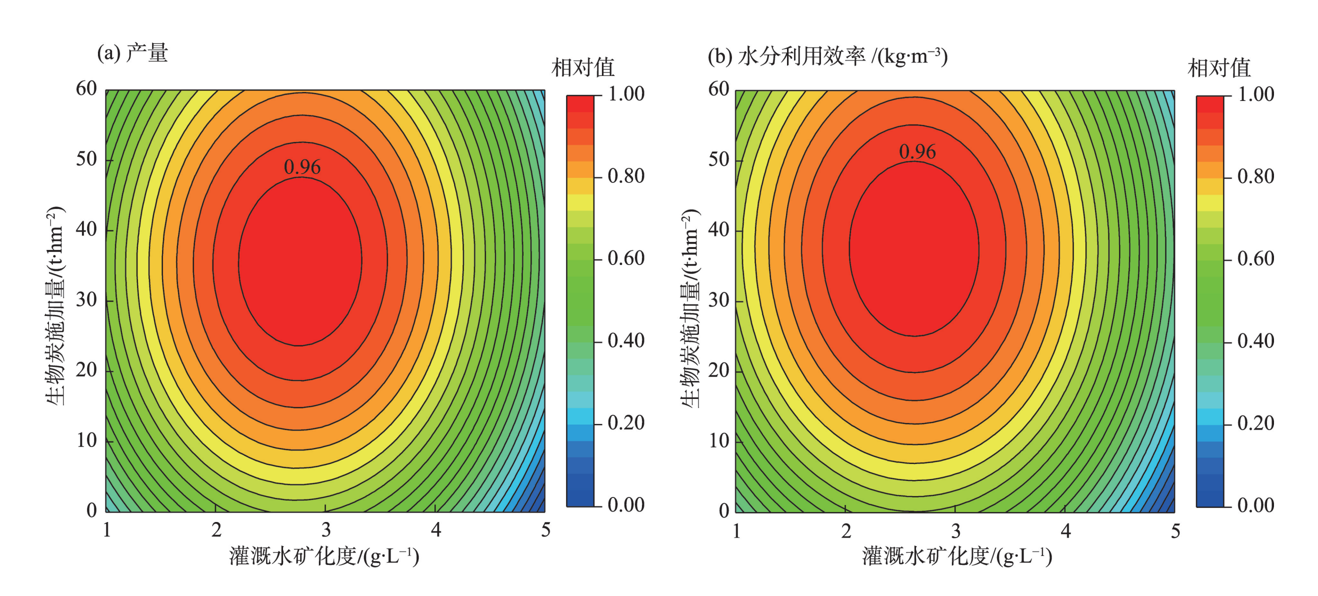


图8　棉花产量和水分利用率归一化相对值

Fig. 8　Normalized relative values of cotton yield and water use efficiency

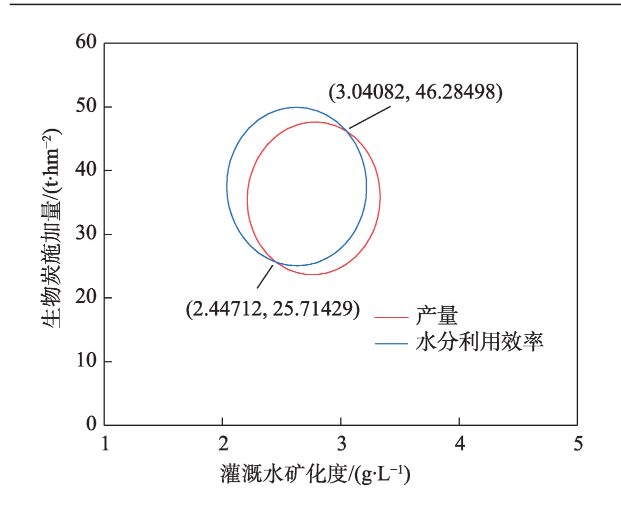


图9 产量和水分利用率的综合评价

Fig. 9 Comprehensive evaluation of yield and water use efficiency

炭通过改变土壤孔隙分布,进而减少水分下渗和水平迁移,进而提高土壤贮水量[28]。施加生物炭使浅层土壤(0~40 cm)含盐量提高,研究结论与吴畏等[29]、陈浩然[30]相似,生物炭本身带有可溶性盐,施加入土壤后,随之加入的可溶性盐量也增加[31]。不同灌水矿化度处理对土壤盐分均随着土层深度的增加而降低,且浅层土壤(0~40 cm)盐分含量较高,其原因是一方面在滴灌过程中,微咸水自身所带的盐分随水进入土壤,导致土壤中含盐量增加。另一方面,滴灌单次灌水量有限且地膜的杂草生长旺盛会顶破地膜,尤其在夏季气温高,日照时间长且土壤蒸发作用强烈的情况下,深层土壤及地下水中的可溶性盐类随地表蒸发并借助于毛细管作用向上移动,从而导致盐分在浅层土壤聚集[32-33]。

3.2 生物炭施加和微咸水滴灌对土壤温度的影响

土壤环境中一切生命活动均伴随热量的吸收和释放,土壤温度直接影响土壤微生物活动。本研究表明,生物炭施加量相同时,棉花全生育期间灌水矿化度对土壤温度影响显著,但差异不显著,这与蒋静等[34]、张俊鹏等[35]研究结果相似,随着灌水矿化度增加,抑制棉花的株高,降低了地面覆盖度[35],促使太阳辐射直达地面,土壤温度升高。李昌见等[36]研究结果与本文得出的不同处理10~40 cm土层平均土壤温度随生物炭施加量增加而升高的结论基本一致,这是由于生物炭呈黑色,易吸收各种波长的光,更易吸收紫外线和可见光的热量[37],并且生物炭表面其复杂的多孔结构为微生物繁殖和生存提供有利场所,其大量微生物进行繁殖和生命活动会释放大量热量[38],从而使土壤温度升高。此外,施加生物炭使得土壤含水率增加,进而使得土壤的热通量变大,土壤温度下降速率较小[39],因此,保持较高的土壤温度,为棉花生长提供适宜的土壤温度条件。

3.3 生物炭施加和微咸水滴灌对棉花生长的影响

株高、叶面积指数和干物质积累量是衡量棉花生长发育和群体株型状况是否合理的重要指标。本研究中,矿化度(3 g·L⁻¹)处理的株高、叶面积指数和地上部干物质量均高于淡水处理,与宋有玺等[40]研究发现,矿化度 < 4.0 g·L⁻¹促进棉花干物质积累的结论相似,适当浓度的盐分具有棉花根系所需的微量营养元素[41],可为棉花生长提供有利环境。但高灌水矿化度(5 g·L⁻¹)抑制作物正常生长,导致株高、叶面积指数及地上部干物质量降低,这与郭仁松等[42]研究结果基本一致,由于灌水矿化度增加,造成土壤中盐分过高,导致土壤中渗透压失衡[24],减弱作物根系吸水能力,从而减缓棉花的生长。在本试验中,施加生物炭显著促进棉花株高、叶面积指数和地上部干物质量,这与李思平等[43-45]研究棉花、小麦、狗牙根等作物研究结果相似,生物炭具有独特结构有利于微生物的生存繁衍,增强土壤生态系统功能,有利于提高土壤有效养分含量[46],进而对棉花生长发育产生积极作用。

3.4 生物炭施加和微咸水滴灌对棉花产量及水分利用率的影响

不同灌水矿化度和施加生物炭影响棉花生长,最终反映在棉花产量和水分利用率上。本研究发现,随灌水矿化度增加,产量及水分利用率呈先增加后减小的趋势。李万精等[24]研究表明,施加适宜灌水矿化度种植的棉花在单铃重、籽棉产量和灌溉水利用效率等方面均高于灌溉淡水处理,与本研究结果一致,施用适宜灌水矿化度促进养分由棉花营养器官向生殖器官的转移[40]。但郭仁松等[42]指出,施用低浓度的灌溉水矿化度对作物产量与施用淡水处理无显著差异,这与本研究结果不一致,可能是与地区气候差异、土壤类型不同有关。在本研究中,灌水矿化度水平相同时,棉花籽棉产量和水分利用率随生物炭施加量增加而先增加后减小的变化趋势,且在B2S2处理取得最大值,可能是因为施用适量的生物炭后植株更易汲取养分与水分,从而促进作物生长,有利于提高籽棉产量[47],但施加过

多生物炭会破坏土壤结构与养分平衡[17],引起产量降低。本研究仅用一年试验数据所求得能够满足多目标最大效益的施生物炭量、灌水矿化度区间,还需要更多的田间试验进行验证。

4 结 论

(1) 施加生物炭与灌水矿化度的增加均使得土壤含水率和含盐量升高,其5 g·L^{-1}增加幅度最大,为15.7%。灌水矿化度为5 g·L^{-1}时含盐量增加,影响棉花根系水分吸收。生物炭施加量和灌水矿化度对土壤温度均存在极显著影响(P<0.01),施加60 t·hm^{-2}生物炭在棉花的生育期内升温幅度最大,增加了12.0%~15.1%,不同灌水矿化度影响土壤温度,但差异不显著。

(2) 生物炭施加和适量灌水矿化度耦合对棉花生长有一定的促进作用,提高棉花株高、叶面积指数、地上部干物质量,进而提高棉花籽棉产量和水分利用率,增加灌水矿化度,棉花产量和水分利用率均表现为先增加后降低的趋势,施加生物炭显著增加棉花产量和水分利用率分别为2.9%~8.3%、2.8%~14.4%。

(3) 构建多元回归方程,基于棉花高产、高水分利用效率结合归一化处理和空间分析得出最佳生物炭施加量、灌水矿化度区间分别为26~46 t·hm^{-2}和2.45~3.04 g·L^{-1}。

因此,对北疆地区而言,基于促进棉花增产和改善土壤质量,推荐采用生物炭施加40 t·hm^{-2}和灌水矿化度3 g·L^{-1}的组合模式,为北疆地区农业可持续发展提供理论依据和技术指导。

参考文献(References):

[1] 石岩, 饶丹. 新疆水资源现状及其可持续利用对策分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 36−38. [Shi Yan, Rao Dan. Analysis of the current situation of water resources in Xinjiang and its sustainable utilization counter measures[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(4): 36−38.]

[2] Li C, Lei J, Zhao Y, et al. Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan Desert Highway shelter belt[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 146: 99−107.

[3] 荆继红, 孙继朝, 韩双平, 等. 西北地区地下水资源分布及开发利用状况[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(5): 54−56. [Jing Jihong, Sun Jichao, Han Shuangping, et al. Distribution and development and utilization of groundwater resources in Northwest China [J]. South-to-North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology, 2007, 5(5): 54−56.]

[4] 庞桂斌, 徐征和, 王海霞, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 35−41. [Pang Guibin, Xu Zhenghe, Wang Haixia, et al. Effects of brackish water irrigation on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 35−41.]

[5] 马凯, 王振华, 王天宇, 等. 氮盐交互对膜下滴灌棉花产量及品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 165−171. [Ma Kai, Wang Zhenhua, Wang Tianyu, et al. Effects of nitrogen-salt interaction on yield and quality of submembrane drip irrigation cotton[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 165−171.]

[6] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969−973. [Zhang Yuliang, Lu Wenlong, Zhang Wei, et al. Effects of long-term brackish water irrigation on soil physicochemical properties of cultivated land[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969−973.]

[7] 黄明逸, 张展羽, 翟亚明, 等. 咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 88−96. [Huang Mingyi, Zhang Zhanyu, Zhai Yaming, et al. Effects of biochar on yield of coastal saline soil and maize under salty and light alternating irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 88−96.]

[8] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651−681.

[9] 魏永霞, 张翼鹏, 张雨凤, 等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 284−291. [Wei Yongxia, Zhang Yipeng , Zhang Yufeng, et al. Soil improvement and water-saving yield increase effect of continuous application of biochar in cultivated land on black soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 284−291.]

[10] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569−1574. [Zhang Na, Li Jia, Liu Xuehuan, et al. Effects of biochar on growth and yield of summer maize[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1569−1574.]

[11] Shafaqat A, Muhammad R, Farooq Q M, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(14): 12700−12712.

[12] Huang M Y, Zhang Z Y, Zhai Y M, et al. Effect of straw biochar on soil properties and wheat production under saline water irrigation [J]. Agronomy, 2019, 9(8): 457.

[13] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应

影响研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1-12. [Gou Mangmang, Qu Zhongyi, Wang Fan, et al. Research progress analysis on effects of biochar application on agricultural production and environmental effects[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1-12.]

[14] 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 797-1802. [Tang Guangmu, Ge Chunhui, Xu Wangli, et al. Effects of application of biological black charcoal on fertility and maize growth in gray desert soil in Xinjiang[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1797-1802.]

[15] Usman A R A, Al-Wabel M I, Ok Y S, et al. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation[J]. Pedosphere, 2016, 26(1): 27-38.

[16] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 57-63. [Chen Fang, Zhang Kangkang, Gu Sicheng, et al. Effects of different types of biochar and application rate on rice growth and soil nutrients[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 57-63.]

[17] 蒋惠, 郭雁君, 张小凤, 等. 生物炭对砂糖桔叶果和土壤理化性状的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2057-2063. [Jiang Hui, Guo Yanjun, Zhang Xiaofeng, et al. Effects of biochar on physicochemical properties of sugar orange leaf fruit and soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(12): 2057-2063.]

[18] 李燕强, 王振华, 叶含春, 等. 灌溉水矿化度对棉田土壤呼吸速率的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 392-402. [Li Yanqiang, Wang Zhenhua, Ye Hanchun, et al. Effects of irrigation water salinity on soil respiration rate in cotton field[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 392-402.]

[19] 邹瑞晗, 吕德生, 王振华, 等. 非灌溉季节施加生物炭对滴灌棉田土壤结构及水热特性的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 220-227. [Zou Ruihan, Lv Desheng, Wang Zhenhua, et al. Effects of biochar application in non-irrigation season on soil structure and hydrothermal characteristics of drip irrigation cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 220-227.]

[20] 王振华, 朱延凯, 张金珠, 等. 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 296-308. [Wang Zhenhua, Zhu Yankai, Zhang Jinzhu, et al. Effects of water and nitrogen regulation on physiological characteristics and yield of mildly saline soil drip irrigated cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 296-308.]

[21] 辛明亮, 何新林, 吕廷波, 等. 土壤可溶性盐含量与电导率的关系实验研究[J]. 节水灌溉, 2014(5): 59-61. [Xin Mingliang, He Xinlin, Lv Tingbo, et al. Experimental study on the relationship between soil soluble salt content and conductivity[J]. Water-saving Irrigation, 2014(5): 59-61.]

[22] 赵嘉涛, 马玉诏, 范艳丽, 等. 生物可降解地膜对棉花产量及水分利用率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(1): 96-101. [Zhao Jiatao, Ma Yuzhao, Fan Yanli, et al. Effects of biodegradable plastic much on cotton yield and water use efficiency[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(1): 96-101.]

[23] 邬强, 王振华, 郑旭荣, 等. PBAT生物降解膜覆盖对绿洲滴灌棉花土壤水热及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 135-143. [Wu Qiang, Wang Zhenhua, Zheng Xurong, et al. Effects of PBAT biodegradable film mulching on soil water and heat and yield of cotton under drip irrigation in oasis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 135-143.]

[24] 李万精, 杨广, 雷杰, 等. 不同矿化度(微)咸水膜下滴灌棉田土壤水盐分布及棉花生长特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 95-103. [Li Wangjing, Yang Guang, Lei Jie, et al. Study on soil water and salt distribution and cotton growth characteristics in drip irrigation cotton field under different salinity (micro) salt water film[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 95-103.]

[25] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64-69. [Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effects of salinization degree of infiltration water on soil infiltration characteristics and ion migration characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64-69.]

[26] 王世斌, 高佩玲, 赵亚东, 等. 微咸水对生物炭作用下盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(2):181-187. [Wang Shibin, Gao Peiling, Zhao Yadong, et al. Effect of brackish water on water and salt transport characteristics of saline-alkali soil under the action of biochar [J]. Drainage and Irrigation Machinery Engineering Journal, 2022, 40 (2): 181-187.]

[27] 赵子璇, 马娟娟, 孙西欢, 等. 褐土区生物炭施用量对水分入渗规律的影响[J]. 中国农村水利水电, 2022(11): 108-112. [Zhao Zixuan, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Effect of biochar application rate on water infiltration in cinnamon soil area[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2022(11): 108-112.]

[28] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 113-119. [Wang Yanyang, Wei Yongxia, Sun Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics of different biochar applications[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 113-119.]

[29] 吴畏, 高佩玲, 郭祥林, 等. 微咸水与生物炭协同作用对盐碱土入渗特征及水盐运移的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 160-167. [Wu Wei, Gao Peiling, Guo Xianglin, et al. Synergistic effects of brackish water and biochar on infiltration characteristics and water-salt transport in saline-alkali soil[J]. Arid Area Agricultural Research, 2023, 41(2): 160-167.]

[30] 陈浩然. 施用生物质炭对新疆旱区膜下滴灌土壤水盐运移及棉

花生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. [Chen Haoran. Effects of Biochar Application on Water and Salt Transport and Cotton Growth in Submembrane Drip Irrigation Soil in Arid Areas of Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.]

[31] 王娟, 黄成真, 冯绍元, 等. 生物炭对滨海滩涂区土壤理化特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 125-130. [Wang Juan, Huang Chengzhen, Feng Shaoyuan, et al. Effects of biochar on soil physical and chemical properties in coastal tidal flats[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 125-130.]

[32] 王海霞, 徐征和, 庞桂斌, 等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 291-297. [Wang Haixia, Xu Zhenghe, Pang Guibin, et al. Effects of brackish water irrigation on soil water and salt distribution and winter wheat growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 291-297.]

[33] 刘雪艳. 微咸水膜下滴灌对土壤水盐运移及棉花生长的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020. [Liu Xueyan. Effects of Drip Irrigation under Brackish Water Film on Soil Water and Salt Transport and Cotton Growth[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020.]

[34] 蒋静, 冯绍元, 霍再林, 等. 不同灌溉条件对春玉米农田土壤水盐热分布影响的试验研究[C]//中国农业工程学会农业水土工程专业委员会, 云南农业大学水利水电与建筑学院. 现代节水高效农业与生态灌区建设(上). 昆明: 云南大学出版社, 2010: 8. [Jiang Jing, Feng Shaoyuan, Huo Zailin, et al. Experimental study on the effect of different irrigation conditions on soil salinity heat distribution in spring maize farmland[C]//Agricultural Soil and Water Engineering Committee of China Agricultural Engineering Society, College of Water Conservancy, Hydropower and Architecture, Yunnan Agricultural University. Modern Water- Saving and Efficient Agriculture and Ecological Irrigation Construction (I). Kunming: Yunnan University Press, 2010: 8.]

[35] 张俊鹏, 冯棣, 郑春莲, 等. 咸水灌溉对土壤水热盐变化及棉花产量和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 161-167. [Zhang Junpeng, Feng Di, Zheng Chunlian, et al. Effects of saline water irrigation on soil water, heat and salt changes and cotton yield and quality[J]. Agricultural Machinery Journal, 2014, 45(9): 161-167.]

[36] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1141-1147. [Li Changjian, Qu Zhongyi, Gou Mangmang, et al. Experimental study on the effect of biochar on soil water and fertilizer thermal effect[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1141-1147.]

[37] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79. [Wu Yu, Xu Gang, Lv Yinchun, et al. Research progress on effects of biochar on soil physical and chemical properties[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79.]

[38] 高利华, 屈忠义. 膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 614-620. [Gao Lihua, Qu Zhongyi. Effects of biochar on soil hydrothermal fertilizer effect under submembrane drip irrigation[J]. Soils, 2017, 49(3): 614-620.]

[39] 符云鹏, 刘天, 李耀鑫, 等. 等碳量添加生物炭和秸秆对烟田土壤呼吸及净碳收支的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1386-1396. [Fu Yunpeng, Liu Tian, Li Yaoxin, et al. Effects of equal carbon addition of biochar and straw on soil respiration and net carbon budget in tobacco fields[J]. Crop Journal, 2023, 49(5): 1386-1396.]

[40] 宋有玺, 安进强, 何岸镕, 等. 微咸水膜下滴灌对棉花生长发育及其产量的影响研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 128-132. [Song Youxi, An Jinqiang, He Angrong, et al. Study on the effect of drip irrigation under brackish water film on cotton growth and development and yield[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 128-132.]

[41] 高若星, 郭文忠, 韩启彪, 等. 灌溉水盐分对设施番茄生长、产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2018(19): 65-70. [Gao Ruoxing, Guo Wenzhong, Han Qibiao, et al. Effects of salinity of irrigation water on growth, yield and quality of tomatoes in facilities[J]. Northern Horticulture, 2018(19): 65-70.]

[42] 郭仁松, 林涛, 徐海江, 等. 微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 211-216. [Guo Rensong, Lin Tao, Xu Haijiang, et al. Effects of brackish drip irrigation on water salt transport characteristics and cotton yield in oasis cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 211-216.]

[43] 李思平, 曾路生, 李旭霖, 等. 不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 363-368. [Li Siping, Zeng Lusheng, Li Xulin, et al. Effects of different formulations of biochar on the growth and photosynthesis of Chinese cabbage and cotton[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 363-368.]

[44] Wang G, Xu Z. The Effects of biochar on germination and growth of wheat in different saline- alkali soil[J]. Asian Agricultural Research, 2013, 5(11): 116-119.

[45] 崔佳音, 李秀芳, 吴世清, 等. 生物炭添加对苦咸水灌溉下玉米生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2022(6): 1-9. [Cui Jiayin, Li Xiufang, Wu Shiqing, et al. Effects of biochar addition on growth and yield of maize under brackish water irrigation[J]. Water-saving Irrigation, 2022(6): 1-9.]

[46] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333. [Chen Wenfu, Zhang Weiming, Meng Jun. Research progress and prospect of agricultural biochar[J]. China Agricultural Sciences, 2013, 46(16): 3324-3333.]

[47] Xie Y X, Dong C, Chen Z Y, et al. Sucessive biochar amendmentafcted crop yield by regulating soil nitrogen functional micobes in wheat-maize rotation farmland[J]. Environmental Research, 2021, 194: 110671.

Effects of biochar application on soil hydrothermal salinity and cotton growth in brackish water drip irrigation cotton field

LAI Hongyu, LYU Desheng, ZHU Yan, WANG Zhenhua, WEN Yue,
SONG Libing, QI Hao

(College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: To address the challenges of fresh water shortage and soil quality decline in northern Xinjiang, a field experiment was conducted, investigating the effects of different irrigation water salinity levels and biochar application on the soil hydrothermal conditions, soil salinity, and cotton growth in cotton fields. Four biochar application levels (B0: 0 $t\cdot hm^{-2}$, B1: 20 $t\cdot hm^{-2}$, B2: 40 $t\cdot hm^{-2}$, B3: 60 $t\cdot hm^{-2}$) and three irrigation water salinity levels (S1: 1 $g\cdot L^{-1}$, S2: 3 $g\cdot L^{-1}$, S3: 5 $g\cdot L^{-1}$) were established. A two-factor completely randomized combination test was used to analyze the effects of these treatments on soil water and salt temperature distribution, cotton growth index, dry matter accumulation, yield, and water use efficiency. The findings indicated that increased biochar and irrigation water salinity levels raised soil water and salt content. Higher biochar application increased the average soil temperature, while irrigation water salinity notably influenced the average soil temperature ($P < 0.01$). B2S2 treatment increased the cotton plant height, leaf area index, and aboveground dry matter. Optimal yield and water use efficiency occurred in the B2S2 treatment. In contrast, the B0S3 treatment displayed the lowest values, 18.50% and 26.87% lower in yield and water use efficiency, respectively, compared to the B2S2 treatment. A multiple regression equation, combined with normalization and spatial analysis, was established. The optimal biochar amount and irrigation water salinity range based on cotton yield and water use efficiency were 26−46 $t\cdot hm^{-2}$ and 2.45−3.04 $g\cdot L^{-1}$, respectively.

Keywords: the amount of biochar applied; brackish water salinity; cotton growth; yield; multivariate regression analysis